



## 보일러 과열증기 냉각기의 온도 안전성에 관한 연구

†하지수 · 김태권\* · 장혁상\*\*

계명대학교 환경과학과, 계명대학교 기계자동차공학과\*, 영남대학교 환경공학과\*\*  
(2012년 1월 21일 접수, 2012년 4월 10일 수정, 2012년 4월 10일 채택)

## An Analysis on the Temperature Safety of a Boiler Desuperheater

† Ji Soo Ha · Tae Kwon Kim\* · Hyuk Sang Chang\*\*

*Environmental Science, Keimyung University, Daegu, Korea*

*\*Mechanical & Automotive Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea*

*\*\*Environmental Engineering, Yeungnam University, Kyungsan, Korea*

*(Received January 21, 2012; Revised April 10, 2012; Accepted April 10, 2012)*

### 요약

본 연구에서는 화력발전소의 재열기 내에 과열증기가 이상 고온이 될 때 과열증기를 냉각하는 과열증기 냉각기의 온도 안전성에 대하여 열전달 해석을 통해 진단하였다. 과열증기 냉각기 내부에 냉각을 위해 액체상태의 냉각수가 밀폐 공간 내에 존재한다. 이곳은 고온의 과열증기에 노출되어 있는 부분으로 가열에 의해 비등이 발생하면 내부 압력이 상승하여 냉각기가 견딜 수 있는 허용 압력 이상으로 되게 된다. 이렇게 되면 냉각기가 파손되거나 냉각수가 역류가 일어나서 안전하지 않게 된다. 본 연구에서는 이의 진단을 위해 냉각기의 형상을 합리적으로 단순화 하고 단열재 여부, 내부 냉각수의 자연대류 유동 고려 여부 등으로 구분하여 4 가지 경우의 열전달 해석을 수행 하였다. 냉각기 내부에 있는 액체 상태의 냉각수에 대하여 자연대류 유동을 고려하지 않는 경우는 온도 상승과 이에 따른 압력 상승으로 안전하지 않은 것으로 나타났다. 그러나 실제 현상인 냉각수의 자연대류 유동을 고려하고 단열재를 사용한 경우에는 냉각수의 자연대류 유동에 따른 고온 영역에서 저온 영역으로 활발한 열전달이 발생하여 냉각수가 허용온도와 허용압력 이하에서 운전되고 있음을 알았고 이에 따라 과열증기 냉각기는 안전하다는 것을 판단할 수 있었다.

**Abstract** - The present study has been carried out to diagnose the temperature safety of a boiler desuperheater which decreases abnormally higher temperature of superheated steam in a reheater of a power plant. The liquid water in the desuperheater stays in a closed space. It becomes heated by the high temperature superheated steam and boiling could occur. Boiling might increase internal pressure and it could destroy the desuperheater if the internal pressure exceeds the allowable pressure of the desuperheater. The present study modeled reasonably the desuperheater and four cases of heat transfer analysis are executed with the consideration of insulator and natural convective fluid flow of the inside cooling water. For the case excluded the natural convective fluid flow, the temperature exceeds the allowable temperature and pressure. On the other hand, for the real case included natural convective fluid flow and insulator, the active heat transfer from higher temperature region to lower temperature region occurs and it makes the temperature in the cooling water below the allowable temperature and pressure. From this fact, it could be thought that the desuperheater in the reheater is safe from destroy or back flow.

**Key words** : desuperheater, natural convective fluid flow, saturated temperature, saturated pressure, buoyancy force

†주저자 : jisooaha@kmu.ac.kr

## I. 서론

화력발전용 보일러에서 증기터빈을 구동시키는 과열증기는 보일러 연소로 내 고온의 연소가스와 과열기나 재열기 내의 수증기의 열교환에 의해서 생성된다. 연소로 내에서 연소가스의 온도가 일시적으로 정상상태 보다 고온으로 운전될 경우에 과열기나 재열기 내의 과열증기의 온도가 비정상적으로 증가하면 증기터빈 등의 운전에 위험이나 악 영향을 줄 수 있다. 이러한 것을 방지하기 위하여 과열기나 재열기에서 증기터빈으로 가는 배관 내에 과열증기의 이상 고온을 방지하기 위하여 과열증기 냉각기(Desuperheater)를 사용한다. 따라서 과열증기 냉각기는 고온(560°C)의 과열 증기에 노출되어 있으며 그 내부에는 보일러 복수기에서 응축된 액체 상태의 보일러수가 과열증기를 냉각하기 위해 냉각기 내부에 밀폐된 상태로 항상 존재하게 된다.

냉각기 내 밀폐된 액체상태의 보일러수는 고온의 과열증기로부터 열전달을 받게 되는데 이 때 액체상태의 물이 상변화를 하여 비등이 일어나면 냉각기 내의 압력이 높아져서 냉각기가 견딜 수 있는 압력보다 높아질 우려가 있다. 이러한 것을 진단하기 위해 과열증기 냉각기에 대하여 열전달 해석을 수행해서 안전성을 진단하려고 한다. 냉각기의 열전달 해석에 관한 기존 연구는 거의 없지만 이의 해석에 필요한 열전달 관련 연구는 많이 수행되어 왔다. 냉각기의 열전달 해석은 냉각기 외부의 강제대류 열전달, 자연대류 열전달에 관한 열전달 계수에 대한 기존 연구 결과[1,2]들을 활용하였고 냉각기내 액체 상태 냉각수의 거동과 열전달은 자연대류 유동 및 열전달 해석이 필요하므로 이에 관한 기존 연구[4,5]들을 참고하였다.

본 연구는 보일러 과열증기의 이상 고온에 대비한 과열증기 냉각기의 온도 분포를 해석하여 냉각기 내의 액체상태 보일러수가 상태변화를 하여 비등이 발생하는지 여부를 분석하여 냉각기의 안전성을 진단하는 것을 목적으로 수행하였다.

## II. 수치해석방법

보일러 과열증기의 이상 고온을 방지하기 위한 과열증기 냉각기에 대한 개략도를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1의 (a)는 냉각기의 실제 형상을 나타낸 것으로 분사관(spray cylinder)와 본체(body) 일부분이 과열증기가 흐르는 관에 노출되어 있고 그 윗부분은 상온에 노출되어 있다. 열전달 해석을 수행하는 해석 범위는 (a)에서 해석범위(analysis domain)

으로 표현한 부분으로 설정하였다. Fig.1의 (b)에는 해석을 수행하기 위한 형상을 간략화한 그림이다. body로 표현된 부분이 냉각기 본체이며 그 내부에 냉각을 위한 액체(water)가 채워져 있다. 아래 부분인 spray cylinder, piston 부분이 고온의 증기에 노출되어 있는 부분이다. 계산 영역의 형상이 대칭이기 때문에 냉각기의 증앙을 중심으로 축대칭으로 가정하였다. 가로 방향을 반경방향(r), 수직방향을 축방향(x)으로 하여 좌표축을 정하였고 이 후의 지배방정식은 이 좌표축을 기반으로 정리하였다.

본 연구에서 열전달 해석을 위해 필요한 지배방정식은 다음과 같다. 다음의 식에서 속도성분이 있는 이유는 냉각기 내의 액체상태의 냉각수가 온도변화에 따라 자연대류가 일어나기 때문에 이에 대한 지배방정식을 나타낸 것이다. 식 (1)은 연속방정식이고 식 (2)와 (3)은 운동량방정식인데 이 식들이 모두 냉각수의 자연대류 현상을 표현하기 위한 것이다. 식 (4)는 열전달 해석에 필요한 에너지 방정식이다.

$$\frac{\partial}{\partial x}(\rho v_x) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(\rho r v_r) = 0 \quad (1)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial x} - \rho g + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_x}{\partial r} \right) \right] \quad (2)$$

$$\rho \left( v_x \frac{\partial v_r}{\partial x} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) = -\frac{\partial P}{\partial r} + \mu \left[ \frac{\partial^2 v_r}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) - \frac{v_r}{r^2} \right] \quad (3)$$

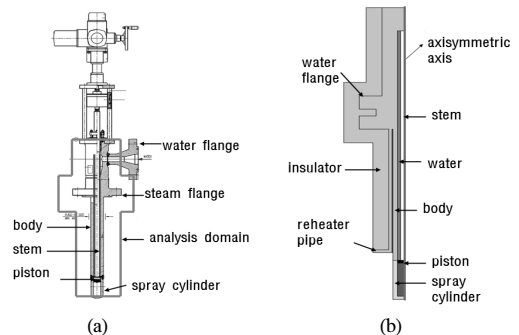


Fig. 1. Configuration of a desuperheater. (a) analysis domain (b) schematic configuration for the present analysis.

**Table 1.** Material properties

Name (Material)	Density (kg/m <sup>3</sup> )	Specific heat (J/kgK)	Thermal conductivity (W/mK)
Spray cylinder (Inconel 718)	8190	435	11.4
Piston (AISI 431)	7800	460	20.2
Stem (AISI 431)	7800	460	20.2
Body (SA 182)	8000	500	16.2
Reheat pipe (SA 182)	8000	500	16.2
Water (Water)	see Fig. 2	4182	0.6

**Table 2.** Convective heat transfer coefficient at the boundary wall of desuperheater

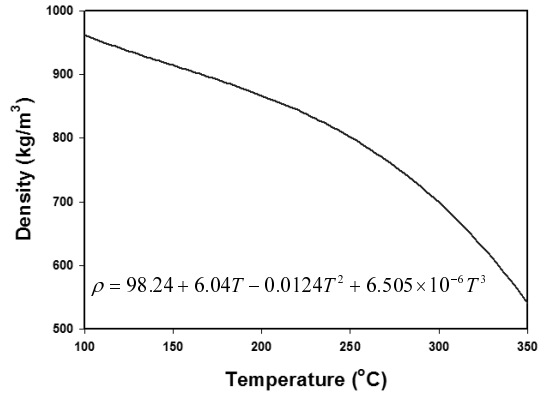
Wall	h (W/m <sup>2</sup> K)	T <sub>∞</sub> (°C)
Spray cylinder	81.50	560
Reheater pipe	61.20	560
Insulator	3.89	25
Top	3.89	25

$$\rho C_p \left( v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = k \left[ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (4)$$

과열증기 냉각기의 각 부분에 대한 물성치는 Table 1에 나타내었다.

액체상태의 냉각수는 재열기 내부에서 과열증기에 노출되어 있는 부분은 온도가 높고 상부로 갈수록 온도가 낮아지는데 이에 따라 물의 밀도가 차이가 나게 된다. 이렇게 밀도 차이가 나면 부력에 의해서 자연대류가 발생하게 된다. 이를 구현하기 위해서 온도 변화에 따른 밀도의 변화를 Fig. 2에 나타내었고 밀도를 온도 의 다항식 함수로 함께 나타내었다.

열전달 해석을 수행하기 위한 지배방정식과 물성치에 대하여 앞에서 살펴보았는데, 이를 위해서 또한 경계조건이 필요하다. 각 위치에서 열전달 해석



**Fig. 2.** Water density variation with temperature.

을 위한 경계조건인 대류열전달계수에 대한 자료는 서론에서 언급한대로 기존의 연구[1,2]에서 보편적으로 사용한 실험식을 사용하여 구하였다. Table에서 Insulator와 Top 부분은 외부 공기와 접촉하는 곳으로 자연대류 열전달 실험식을 이용하였고 다른 두 부분은 고온의 증기와 접촉하는 곳으로 강제대류 열전달 관련 실험식을 이용하였다. 이렇게 구한 경계조건을 Table 2에 나타내었다.

본 연구에서 열유동해석에 사용한 전산해석 소프트웨어는 열유체 전산해석에 널리 사용되고 있는 상용코드인 Fluent 소프트웨어를 사용하였다. 격자의 개수는 약 75만개를 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 3.1. 열전달 해석 종류

과열증기 냉각기의 안전성 진단을 위해 앞 절에서 언급한 수치해석 방법으로 열전달 해석을 수행하였는데 다음과 같이 형상과 조건을 변경하여 4 가지 종류에 대하여 비교 검토함으로써 판단하기로 하였다. 4가지 종류 중 Case 1은 액체상태의 냉각수에 대하여 자연대류 유동을 고려하지 않고 단순히 열전도만 고려한 경우이며, 또한 상온에 노출된 냉각기의 단열재를 제거한 경우에 해당한다. 이를 통해서 자연대류를 고려하지 않을 경우와 단열재를 사용하지 않을 경우에 대하여 온도 분포가 어떻게 나타나는지를 살펴보고자 하였다. Case 2의 경우는 Case 1의 경우에서 단열재를 사용한 경우에 해당한다. Case 3 과 Case 4의 경우는 액체상태의 냉각수에 대하여 자연대류 유동을 고려한 경우이며 Case 3은 단열재를 사용하지 않은 경우이고 Case 4는 단열재를 사용한 경우이다. 4 가지 종류의 해석에서 가장 실제와 유사한

경우는 Case 4인데 다른 경우의 해석은 Case 4를 기준으로 해석에서 고려해야 할 것이나 단열재의 효과 등을 비교 검토하기 위한 것으로 활용하였다.

### 3.2. 해석 종류별 온도 분포 및 유동 거동 특성 비교

3.1절에서 선정한 4 가지 해석 종류별 온도 분포 특성 비교를 Fig. 3에 나타내었다. Case 1의 온도 분포 결과를 살펴보면, 560°C의 과열증기에 노출되는 분사관 영역의 온도가 높게 나타나고 상온에 노출되는 상부 영역의 온도는 낮게 나타나고 있다. 특히 관심의 대상이 되어 있는 액체 상태의 냉각수 온도를 관찰해 보면, 분사관과 가까이 있는 영역의 온도가 약 470°C 정도로 나타나고 있다. 과열증기 냉각기의 재질을 감안한 경우, 이 재질이 견딜 수 있는 최대 압력이 110bar인데 이에 해당하는 포화온도는 316°C이다. 이 온도를 넘어가게 되면 냉각수가 비등이 일어날 가능성이 있으며 비등이 일어나면 냉각기 내부의 압력이 110bar 이상 올라갈 가능성이 있게 되어 냉각기가 파손되거나 냉각수가 역류가 일어나거나 하여 안전하지 않게 된다. Case 1의 경우는 냉각수가 포화온도보다 높은 영역이 존재하기 때문에 안전하지 않다고 판단된다. Case 2의 경우는 Case 1에서 단열재를 사용하였기 때문에 관심이 되고 있는 냉각수 영역의 온도가 더욱 올라간다. 분사관 부근의 냉각수 온도가 약 500°C 정도이고 상부로 가면 서도 Case 1 보다 온도가 높다.

Case 3의 경우는 냉각수의 자연대류 유동을 고려하고 단열재를 사용하지 않은 경우이다. 이 경우에는 분사관 부근에 있는 액체상태의 냉각수는 가열이 되어 밀도가 낮아지고 상대적으로 낮은 온도의 상부 영역의 냉각수는 밀도가 높아져 부력에 의한 자연대류 유동이 발생하게 된다. 이에 따라 분사관 부근의 높은 온도 냉각수는 상부로 이동하게 되고 반대로

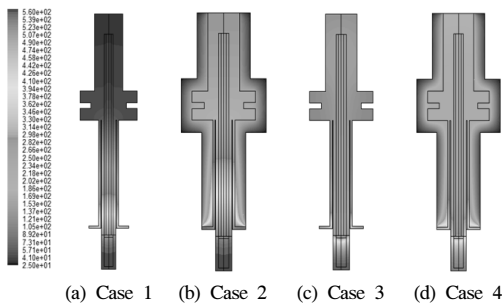


Fig. 3. Temperature distribution in the desuperheater for four cases.

상부의 낮은 온도의 냉각수는 하부로 이동하게 되어 상부와 하부로 열전달이 활발하게 일어나게 된다.

이러한 유동 거동에 대한 것을 Fig. 4에 나타내었다. 상부, 중앙, 하부에서의 속도벡터를 살펴보면 앞에서 언급한 바와 같이 관내에서 한쪽은 상승하는 흐름이고 다른 한쪽은 하강하는 유동 거동을 관찰할 수 있다. 이러한 흐름에 의해서 냉각수는 상부와 하부의 열전달이 활발히 일어나게 된다.

이렇게 되어서 Case 1과 Case 2에서 관찰할 수 있었던 분사관 부근의 냉각수의 온도는 상대적으로 낮게 되어 약 210°C 이하로 나타났다. 이 온도에서는 앞에서 언급한 포화온도 보다 낮기 때문에 비등이 발생하지 않을 것으로 판단된다. 실제와 가장 가까운 Case 4의 경우에도 단열재를 사용하여 Case 3의 경우 보다 분사관 부근이나 상부의 냉각수 온도가 높게 나타나지만 분사관 부근의 높은 온도가 약 280°C이어서 포화온도보다 낮게 나타나서 안전하다고 판단된다.

Fig. 5에 Case 3과 Case 4에 대하여 냉각수의 평균온도와 최대온도를 기준으로 포화온도에 해당하는 포화압력을 산출하여 냉각수의 운전압력인 43bar와 최대허용압력인 110bar를 비교하여 나타내었다. Fig. 5에 나타난 곡선은 물의 포화온도에 대한 포화압력을 나타낸 선이며 Case 3과 Case 4의 평균 온도와 최대온도에 해당하는 압력 모두가 최대허용

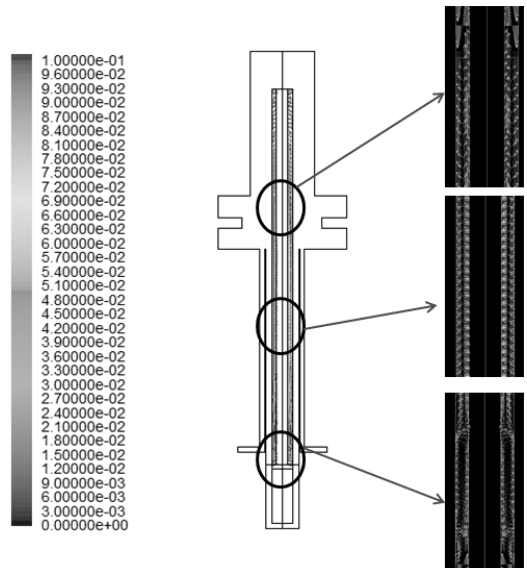


Fig. 4. Velocity vector plot of the natural convective fluid flow in the cooling water for Case 3.

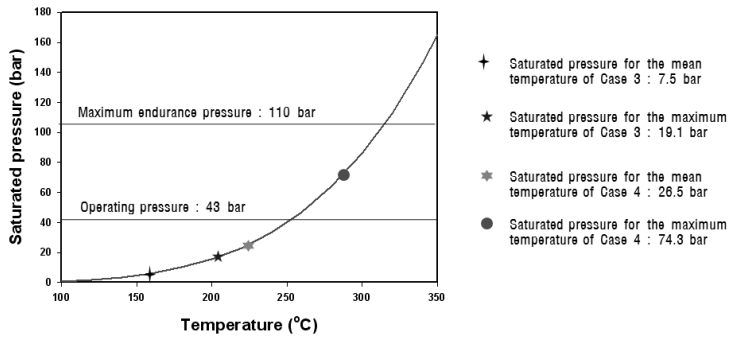


Fig. 5. Saturated pressures for the calculated temperatures of Case 3 and Case 4.

압력 내에 들어가 있음을 알 수 있다.

따라서 냉각수의 부력에 의한 자연대류를 고려한, 실제 현상과 가까운 Case 3 이나 Case 4의 경우는 냉각수가 가열에 의해 비등이 일어나지 않음을 알 수 있었고 과열증기 냉각기는 안전함을 판단할 수 있었다.

#### IV. 결론

보일러 과열증기 냉각기가 고온의 재열기 내부 과열증기에 노출되었을 때 냉각기 내부에 있는 냉각수가 가열에 의해 온도가 상승하여 비등이 일어나면 내부의 압력이 올라가서 냉각기가 안전하지 않을 우려가 있기 때문에 이에 대한 열전달 해석을 수행하여 안전성을 진단하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 과열증기 냉각기에 대한 열전달 해석을 위해 냉각기의 형상을 단순화하여 모델링하였고 상온에 노출되는 영역에 단열재를 사용하지 않은 경우와 한 경우, 그리고 냉각기 내부의 액체 상태 냉각수에 대하여 자연대류 유동을 고려하지 않은 경우와 한 경우 등 총 4 가지 조건과 형상에 대하여 열전달을 수행하였다.

(2) 4 가지 종류의 열전달 해석 결과 냉각수의 자연대류 유동을 고려하지 않은 경우는 과열증기에 노출되는 분사관 인근에서의 냉각수 온도가 허용온도 (316°C)와 이에 따른 허용 압력(110bar)보다 높게 나타나서 이러한 경우에는 냉각기의 안전성에 문제가 발생하는 것으로 나타났다.

(3) 실제적인 현상은 액체 상태의 냉각수가 온도

와 이에 따른 밀도 차이에 의해 자연대류 유동이 발생하여 하부의 높은 온도가 상부로 열전달이 활발히 일어나서 분사관 부근에서 냉각수의 최대온도가 허용온도도 보다 낮게 나타나서 이에 상응하는 압력이 허용 압력보다 낮아지게 되어 안전한 것으로 진단되었다. 특히 가장 실제적인 형상과 조건인 단열재를 사용하고 자연대류 유동을 고려한 경우에도 최대 온도가 약 280°C이고 이에 해당하는 압력이 74.3bar로 나타나서 허용 압력 이하이기 때문에 안전한 것으로 판단할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] Frank P. Incropera, David P. DeWitt, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 5th Edition, J. Wiley, New York, (2002)
- [2] Sadik Kakac, Rammesh K. Shah, Win Aung, *Handbook of Single Phase Convective Heat Transfer*, 1st Edition, Wiley-Interscience, New York, (1987)
- [3] 정재현, 송종일, “배열회수보일러의 부분부하운전에 따른 과열기 튜브들의 응력거동 해석”, 한국태양에너지학회지, 제28권 제6호, 33-39, (2008)
- [4] 이승만, 이병곤, “밀면이 가열되는 정사각형 밀폐공간 내의 비정상 자연대류”, 대한설비공학회, 99년 하계학술발표회 논문집, 838-843, (1999)
- [5] 이상훈, 양대열, “단열체를 삽입한 정사각 공간의 자연대류 열전달”, 대한설비공학회, 2002년 하계 학술발표회 논문집, 749-754, (2002)